

DOI: 10.5846/stxb202012313332

王迪, 韩立建, 李世玉, 李伟峰, 钱雨果, 周伟奇, 谭晓芮, 李国栋. 城市群空气污染综合评估范式与应用——以京津冀城市群 PM_{2.5} 污染为例. 生态学报, 2021, 41(11): 4278-4287.

Wang D, Han L J, Li S Y, Li W F, Qian Y G, Zhou W Q, Tan X R, Li G D. Comprehensive evaluation model for air pollution and its application: an example of PM_{2.5} pollution in city cluster of Beijing, Tianjin and Hebei Province. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(11): 4278-4287.

城市群空气污染综合评估范式与应用 ——以京津冀城市群 PM_{2.5} 污染为例

王 迪^{1,2}, 韩立建^{2,3,*}, 李世玉⁴, 李伟峰^{2,3}, 钱雨果², 周伟奇^{2,3,5}, 谭晓芮^{2,3}, 李国栋^{2,6}

1 云南大学国际河流与生态安全研究院, 昆明 650500

2 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

3 中国科学院大学, 北京 100049

4 云南大学生态学与环境学院, 昆明 650500

5 北京城市生态系统研究站, 北京 100085

6 汕头大学工学院, 汕头 515063

摘要:城市群已成为中国城市发展的主要形式, 城市化发展引发的一系列环境污染问题成为目前的研究重点之一, 尤其是近年来明显的空气污染问题。由于传统的针对某一城市地区进行细致研究, 难以解决在城市聚集的城市群下形成的区域性空气污染来源和影响机制等问题, 使区域性空气污染造成的负面效应难以评估。通过构建综合评估模型范式, 并运用空间分析, 对京津冀 168 个区县 2000 年, 2005 年, 2010 年, 2015 年 PM_{2.5} 人口暴露风险、人类活动对 PM_{2.5} 的贡献、以及 5 种土地利用类型的“源汇”特征进行了实证研究。结果发现: (1) 2000—2015 年, 京津冀城市群的人口暴露风险、空气污染分布、综合评估结果总体呈现北低南高的现象。(2) 2000—2015 年, 各县域的人口暴露风险和空气污染的程度、范围呈上升趋势。不同的土地利用类型具有不同的源汇特征, 且对污染的贡献不同。本研究通过综合评估模型范式对城市群或区域城市发展与空气质量的权衡关系模式开展量化解析, 为城市的可持续发展提供了科学的范式和初步的实证示范。

关键词: PM_{2.5}; 京津冀; 综合评估模型

Comprehensive evaluation model for air pollution and its application: an example of PM_{2.5} pollution in city cluster of Beijing, Tianjin and Hebei Province

WANG Di^{1,2}, HAN Lijian^{2,3,*}, LI Shiyu⁴, LI Weifeng^{2,3}, QIAN Yuguo², ZHOU Weiqi^{2,3,5}, TAN Xiaorui^{2,3}, LI Guodong^{2,6}

1 Institute of International Rivers and Eco-security, Yunnan University, Kunming 650500, China

2 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

4 School of Ecology and Environmental Science, Yunnan University, Kunming 650500, China

5 Beijing Urban Ecosystem Research Station, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

6 College of Engineering, Shantou University, Shantou 515063, China

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0503004); 国家自然科学基金项目 (41590841, 41771201)

收稿日期: 2020-12-31; **修订日期:** 2021-04-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ljhan@rcees.ac.cn

Abstract: The development of urbanization leads to the continuous expansion of city scale. Than formal city clusters which have become a major form of urban development in China with heavy fine particle $\text{PM}_{2.5}$ pollution. Beijing-Tianjin-Hebei region is one of the most polluted city clusters in China. $\text{PM}_{2.5}$ is identified as the major air pollutant in recent year. It not only affects the development of natural economy and society, but also affects the human respiratory system, cardiovascular system and central nervous system. The research of air pollution on regional scale is more complicated. However, the comprehensive impact between urban development and $\text{PM}_{2.5}$ changes have not been well examined. It is difficult to assess the negative effects of air pollution, regional air pollution sources and impact mechanisms. Therefore, this research uses spatial analysis by constructing an evaluation model. We study residents' exposure risk, contribution of human activities to $\text{PM}_{2.5}$ and source and sink features of five land-use types in 168 counties in 2000, 2005, 2010, and 2015. Meanwhile, we analyzed their variation and the corresponding weights were given for comprehensive evaluation. The results showed that: 1) both the risk and air pollution distribution increased rapidly from 2000 to 2014, especially in North and South Beijing-Tianjin-Hebei region. The comprehensive impact continued to rise, especially in Central and South Beijing-Tianjin-Hebei region. 2) The region and role of "source and sink" are constantly changing. Therefore, different land types have different source and sink characteristics, which have different contributions to environmental issues. Air quality research should be carried out simultaneously with the development of urbanization, and coordinated with the development of urbanization. This research has established a related evaluation system. We want to carry out quantitative research between urban development and air pollution to provide scientific support for the sustainable development of cities. We hope the results in this work could serve as an example to the internal changes of air pollution and ecological pattern.

Key Words: $\text{PM}_{2.5}$; Beijing-Tianjin-Hebei; comprehensive evaluation model

随着我国城市化进程的加快,城市空间聚集和交往加深,城市群已成为中国新型城镇化的主体形态^[1],同时,城市化进程带来的一系列环境污染问题,也将成为未来研究的热点。空气污染是城市化进程所造的环境问题之一,也是直接影响人类生存发展的主要威胁之一^[2]。空气污染不仅会对自然经济社会的发展造成影响,同时还威胁人的身体健康^[3],例如 $\text{PM}_{2.5}$ 会对人体呼吸系统、心血管系统以及中枢神经系统等造成影响^[4-5]。由于在城市化发展中,人口排放、能源结构、景观格局等自然经济社会影响因素的改变^[6],使我国对空气污染影响的研究愈发复杂。与此同时,空气污染影响的复杂程度也随着研究尺度/区域的转变不断变化,传统的针对某一城市地区进行细致研究,难以解决在城市聚集的城市群下形成的区域性空气污染来源和影响机制等问题,使区域性空气污染造成的负面效应难以评估^[7]。近年来,以细颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 为首要污染物的城市与区域空气污染问题逐渐暴露出来^[8-9]。国内外城市化与空气污染物的研究相对独立,两者耦合性研究较少^[10],区域尺度对空气污染是以城市为中心,探讨城市对区域的影响,但在城市群尺度下,此类探讨具有局限性,无法量化评估空气污染物对城市群的影响。

针对当前的研究现状和空气污染治理的紧迫性,本研究建立了区域空气污染物的综合评估模型范式,并以我国大气污染最集中、最严重的区域-京津冀地区为例^[11],选取当地空气污染的首要污染物 $\text{PM}_{2.5}$ ^[12],进行实证示范研究。从空气污染的负面效应、人类活动贡献情况与景观格局源汇三个角度按县域进行划分,开展区域空气污染评估范式的定量化研究,探索城市化与空气质量的影响关系,为城市可持续性发展提供科学的参考。

1 城市群空气污染综合模式评估范式

1.1 综合模式评估方法体系

空气污染在城市群中具有明显的区域性和集聚性特征^[13]。为探究城市群与空气污染之间的关系,可建立以下污染模型范式,即以空气污染物 $\text{PM}_{2.5}$ 对城市群的污染影响、格局分布和源汇特征三个关系要素为参

考,利用 ArcGis 对每个县域内 X_i (i 种个数) 关系因素进行空间分析,然后对多种关系因素进行加权,分析 $PM_{2.5}$ 污染在城市群之间的空间关系和综合差异。

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots)$$

在本研究中,因没有明确的应用场景,故将该模式简化为了一般线性模式(如下)。后续研究中如针对具体的应用场景,可根据管理需求选取不同的函数组成关系、指标及其权重。

$$Y = aX_1 + bX_2 + cX_3 \dots$$

Y 表示空气污染综合评估模式。其中, X_i 因素可用多种方式表达,比如城市对周边影响的模式^[14]、城市人口暴露模式^[15]、污染物影响或暴露模式等。这些内容在相关研究中都有了较为成熟的积累,本文为了避免重复,同时保障体系的完整性,从污染对人口的影响,人类活动对污染的贡献和生态系统的源汇效应三个方面开展了相关的示范研究工作。

本研究关系因素 X_1 、 X_2 、 X_3 从污染物影响、人类活动和生态活动三个方面考虑,选取人口暴露风险值 X_1 、人类活动对 $PM_{2.5}$ 的贡献度 X_2 、源汇景观贡献度 X_3 , a 、 b 、 c 分别为 X_1 、 X_2 、 X_3 所对应的权重因子。目前评价指标权重的方法有很多,比如主成分分析法、层次分析法、模糊评价法等,不同方法具有不同的优缺点,比如主成分分析法可客观地确定指标权重,但存在一定的信息损失,适用于指标资料较全面和指标之间相关性强的指标体系;层次分析法的计算过程简单,但评价过程主观性强,适用于多种类型生态系统的评估;模糊评价法的计算方法简单且不用考虑变量的相关关系,但参照系统选取主观性强,只能反映相对大小,适用于初步的判定和不同大、小尺度的评价。为了体现综合模式的地区差异性特征,这里选择 a 、 b 为 0.25,每种土地利用类型的 c 为 0.1,总和为 1,作为相关因素的权重值,对京津冀地区的“影响-格局-源汇”进行分析。利用以上公式,计算 $PM_{2.5}$ 综合差异程度,从而探究城市群之间空气污染物的空间作用关系,验证模型范式的可行性。

1.1.1 人口暴露风险

空气污染不仅影响能见度^[16],还威胁人体健康。长期/短期暴露在空气污染中都会增加人类呼吸系统和心肺疾病的概率^[17],同时,造成一定的健康经济损失^[18]。北京地区 2014—2016 年 $PM_{2.5}$ 污染的人口暴露风险强度是通过人口暴露风险评估模型进行计算^[19]。本文选取此研究模型,对京津冀地区 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年人口暴露风险特征进行计算,用人口密度乘以 $PM_{2.5}$ 污染物质量浓度按县域求其均值的结果作为评价指标,评估人口暴露于 $PM_{2.5}$ 污染物的风险。计算方法如下:

$$E_i = P_i \times C_i$$

式中, E_i 为像元 i 的人口暴露风险; P_i 表示像元 i 内的人口密度值; C_i 为像元 i 的 $PM_{2.5}$ 质量浓度值,计算单位为 $\mu\text{g 万人 m}^{-3}\text{km}^{-2}$ 。

1.1.2 人类活动对 $PM_{2.5}$ 的贡献度

空气污染物的空间分布反映污染的区域差异性,时间分布反映污染的演变特征。WHO 在 $PM_{2.5}$ 对人体健康影响程度的基础上制定了相应的空气质量标准。由于考虑到中国 $PM_{2.5}$ 浓度整体较高,因此我们放大了 $PM_{2.5}$ 浓度评价范围,在此基础上制定了对应的 $PM_{2.5}$ 浓度划分标准。传统的 $PM_{2.5}$ 污染暴露研究并不是具体的分析暴露人口的来源,而是仅将其归因于 $PM_{2.5}$ 污染的加剧和面积增加,并未考虑城市化引发的人口迁移所产生的贡献。本文人类活动对 $PM_{2.5}$ 的贡献度,采用基于人口加权的大气污染暴露模型^[20],评估京津冀地区各县域的人口加权 $PM_{2.5}$ 污染暴露水平。用不同浓度下的人口作为权重因子,能更好的贴合实际数值^[21],计算方法如下:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i \times C_i)}{P}$$

式中, E 为京津冀地区各县域的人口加权污染物浓度, C_i 为像元 i 的 $PM_{2.5}$ 质量浓度值, P_i 为像元 i 内的人口数, n 为研究区域的像元数量, P 为研究区域的总人口数,单位为 $\mu\text{g/m}^3$ 。

1.1.3 源汇景观贡献度

在格局与过程研究中,“源”景观指能促进生态过程发展的景观类型;“汇”景观是阻碍或延缓生态过程发展的景观类型^[22]。区域源/汇景观对城市热岛的贡献程度反映区域城市热岛的强度^[23]。在武汉城市热岛的研究中,水体比绿地更加具有缓解城市热岛效应的功能^[24]。对于空气污染而言,工业用地、道路、商业区和居民区属于促进生态进程的“源”,城市的森林、草地、耕地、水体属于阻碍污染发展的“汇”^[25]。可以看出,在不同的环境问题中相同的土地利用类型扮演不同的贡献角色,源/汇角色和区域是相对动态变化的。在本文中,将基于遥感影像提取的不同土地利用类型分为森林、草地、水体、耕地、建成区 5 种,对 5 种土地利用类型进行空间相关分析,以探求其源汇空间分布特征和规律,公式如下:

$$CI = (C_i - C_{\text{Mean}}) \times \frac{S_i}{S}$$

式中, CI 表示源区/汇区对空气污染的贡献度; C_i 、 S_i 分别表示某一区域汇区/源区的 PM_{2.5} 质量浓度值与面积; C_{Mean} 、 S 分别表示该区域的 PM_{2.5} 质量平均浓度值和面积。一般源区其 CI 值 >0 ,汇区其 CI 值 <0 。

2 典型研究区选择与数据预处理

2.1 研究区域

城市化进程不仅会影响社会经济与生态环境的协同发展,还会影响区域生态安全的构建^[26]。京津冀城市群范围包括北京市、天津市以及河北省的保定、廊坊、唐山、石家庄、秦皇岛、张家口、承德、邢台、沧州、衡水、邯郸等 11 个地级市,其中北京、天津、保定、廊坊为中部核心功能区(图 1)。选取京津冀地区 168 个县域单元作为研究对象,其中部分面积较小的地区合并计算,例如北京和天津的南部地区。京津冀城市群作为中国的“首都经济圈”,是中国重要的经济核心区,也是目前全球空气污染最为严重的区域之一。在 2019 中国环境状况公报中显示,京津冀城市群 2019 年 PM_{2.5} 的算术平均浓度为 57 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,比 2018 年变化减少了 1.7%,离世界卫生组织 WHO 制定的第一阶段空气质量标准 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 仍有一定距离。

2.2 数据来源

本研究数据用到了 2000、2005、2010、2015 年京津冀城市群的 PM_{2.5} 数据、人口栅格数据和土地覆盖分类数据。PM_{2.5} 数据来源于达尔豪斯大学大气成分分析组 (Atmospheric Composition Analysis Group at Dalhousie University) (数据编号为 V4.CH.03)。该数据是基于 CEOS-Chem 化学传输模型的模拟,通过中等分辨率成像光谱仪 (MODIS) 和多角度成像光谱仪 (MISR) 反演的气溶胶光学深度数据 (AOD) 与气溶胶垂直剖面 and 散射特性的结合进行估算而得到,并结合地理加权回归模型和实测数据在我国范围内进行了定制研究, $r^2 = 0.81$; $\text{slope} = 0.68$,具有较好的精度,解决了该数据产品前期在我国高污染区域的低估问题^[14]。本研究所选用的是 2000、2005、2010、2015 年京津冀城市群 PM_{2.5} 数据,其空间分辨率为 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$,约为 $1000 \text{ m} \times 1000 \text{ m}$ 。

人口栅格数据来源于美国能源部的橡树岭国家实验室 (ORNL) 开发的分辨率为 $1000 \text{ m} \times 1000 \text{ m}$ 的 LandScan 全球人口分布数据 (<https://landscan.ornl.gov/>)。该数据的空间分辨率与 PM_{2.5} 浓度数据相同,本

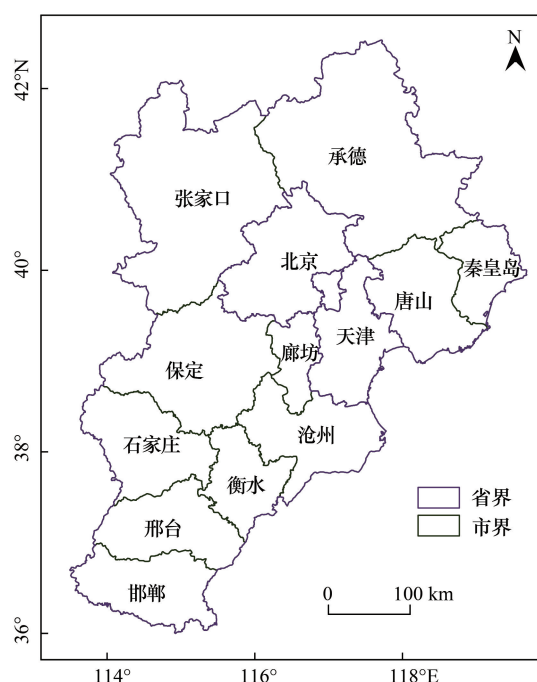


图 1 京津冀地区图

Fig.1 The region of Beijing-Tianjin-Hebei

研究通过京津冀边界数据进行裁剪,得到 2000、2005、2010、2015 年我国同期的京津冀城市群的人口栅格数据。

土地覆盖分类数据来源与 2000、2005、2010、2015 年 Landsat5、Landsat7、Landsat8 遥感影像数据,通过对京津冀城市群进行遥感分类得到,该数据的空间分辨率为 $30\text{ m}\times 30\text{ m}$,具有较好的精度,总体精度达到 80% 以上^[14, 27-28]。

3 主要结果讨论

3.1 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的人口暴露特征分析

图 2 为基于人口暴露强度的京津冀地区 $\text{PM}_{2.5}$ 县域均值人口暴露空间分布。从分布上看,人口暴露风险呈北低南高分布,北京南部、天津东南部、石家庄东部以及邯郸中部和东部地区具有较高的风险暴露特征,这些地区的人群易受到较高的健康风险威胁。张家口、承德和北京北部地区的暴露风险值相对较低,区域均值普遍小于 $1\mu\text{g}\text{ 万人 m}^{-3}\text{ km}^{-2}$,这些地区的人群几乎没有受到健康风险威胁。京津冀地区 $\text{PM}_{2.5}$ 人口暴露与其人口密度分布呈现高度的一致性,即人口密度较高的地区,受到的暴露风险也越高。从时间尺度上看,2000—2015 年风险暴露严重性呈现不断加剧的趋势,2015 年京津冀暴露风险最严重,多数地区存在高风险暴露的情

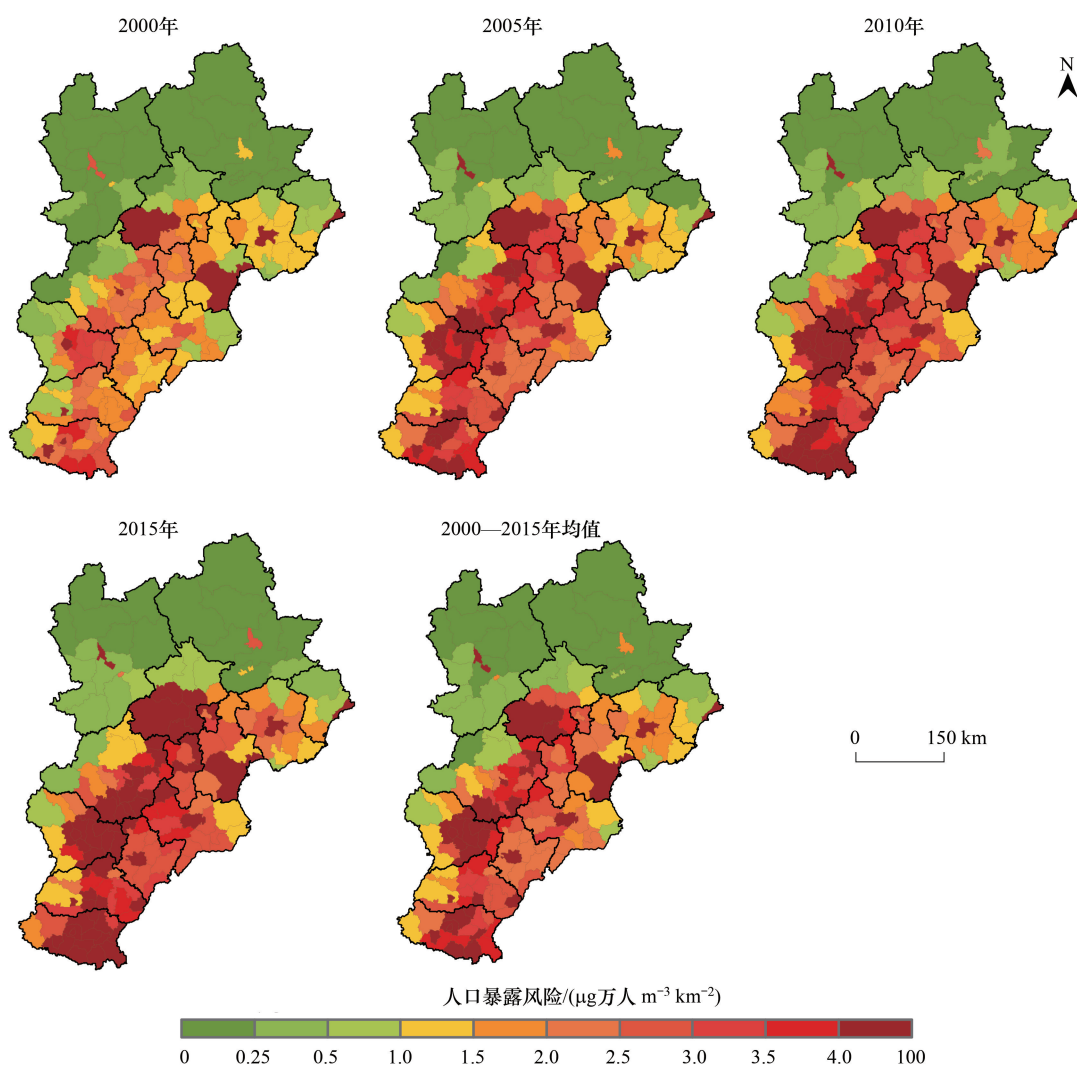


图 2 2000—2015 年京津冀年均人口暴露风险

Fig.2 Average annual $\text{PM}_{2.5}$ population exposure risk in Beijing-Tianjin-Hebei region (2000—2015)

况。从多年平均的结果来看,高风险暴露地区主要集中在北京、天津的主城区,保定、石家庄、衡水地区三者的交汇地带以及邯郸的南北地区。这些地区的居民将遭受较严重的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染影响。同时,随着暴露于高污染区域的人口数增大,大部分人面对较高的健康风险威胁。

3.2 $\text{PM}_{2.5}$ 人口加权浓度特征分析

从空间特征来看,人口加权的 $\text{PM}_{2.5}$ 分布呈明显的南高北低的特点(图3)。以张家口和承德地区往南,是人口加权 $\text{PM}_{2.5} < 75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的主要聚集区,张家口、承德地区与保定、北京、天津和唐山地区之间存在相对明显的边界特征,可能是污染物短距离传输而导致周边县域污染浓度较高。除此之外,2000—2015 年人口加权 $\text{PM}_{2.5} > 75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 区域范围不断扩大,尤其 2015 年保定市区的人口加权 $\text{PM}_{2.5} > 105 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。这种重度污染现象造成原因有两方面,一是不同区域位置气候条件差异的影响,二是从北京南部以南,传统重工业城市空间上较为密集,污染物排放量相对较大,且高密度的建筑集中,不利于污染物扩散,导致 $\text{PM}_{2.5}$ 污染范围相对聚集^[29]。时间特征上,2000—2015 年污染程度随时间变化上升,随着我国城市化进程的发展,环境中的污染物总量超过了生态阈值,导致相邻县域边界的污染不断加剧。从多年平均结果来看,人口加权 $\text{PM}_{2.5} > 75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 污染长期主要集中在石家庄东部地区,衡水西部和中部地区以及邢台北部和中部地区,这些地区的污染长期难以缓解。

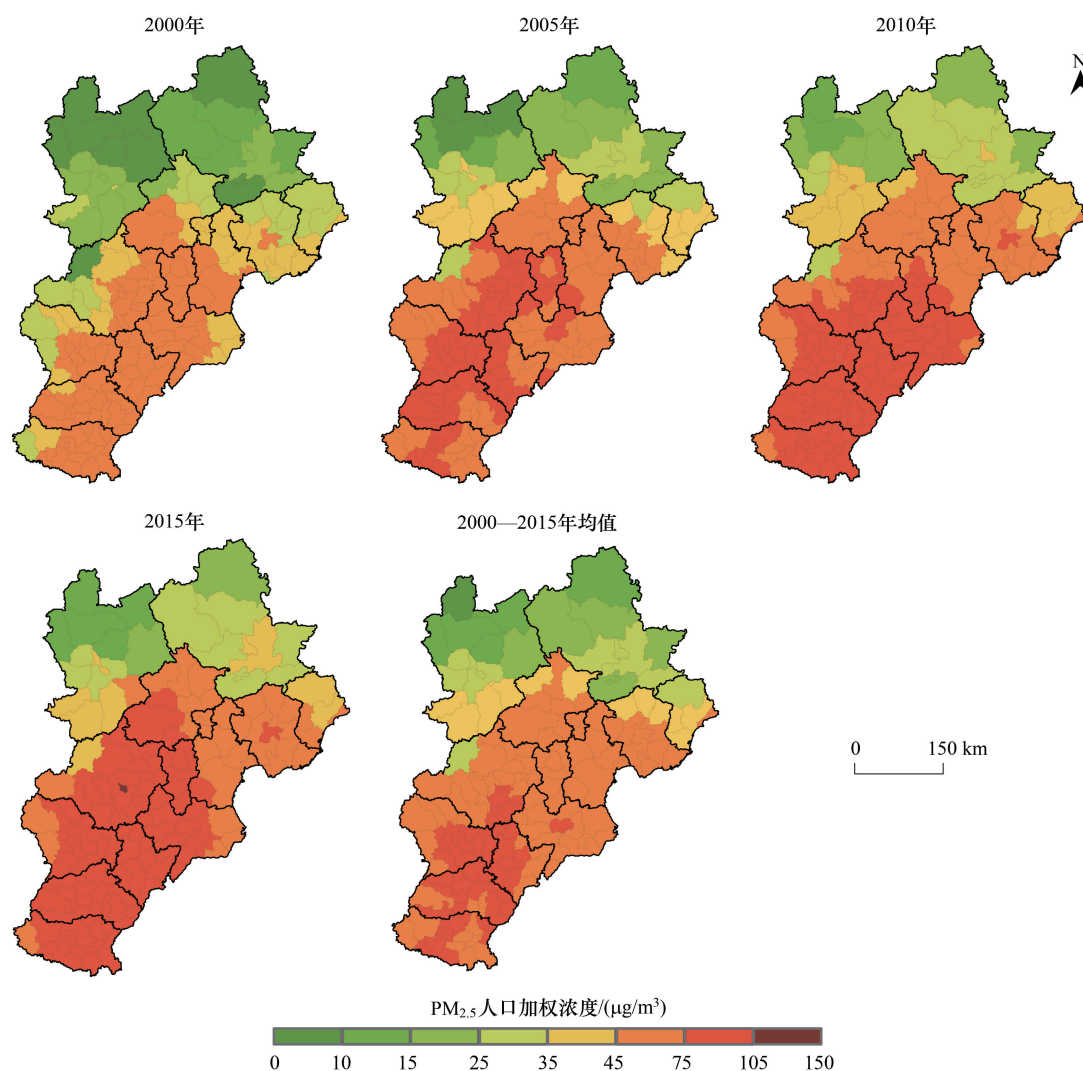


图3 2000—2015 年京津冀年均 $\text{PM}_{2.5}$ 空间分布

Fig.3 Annual mean spatial pattern of $\text{PM}_{2.5}$ in Beijing-Tianjin-Hebei region (2000–2015)

3.3 景观类型“源汇”空间特征

不同土地利用类型具有不同的源汇特征。例如,森林主要以阻碍污染过程为主,而城市作为主要的污染贡献源,常促进污染的发生。由图 4 可知,京津冀北部地区的森林以为汇为主,但在 2005—2015 年承德市丰宁县的森林是作为源区,京津冀地区南部的森林源汇分布破碎。随时间变化,同一地区的相同土地利用类型

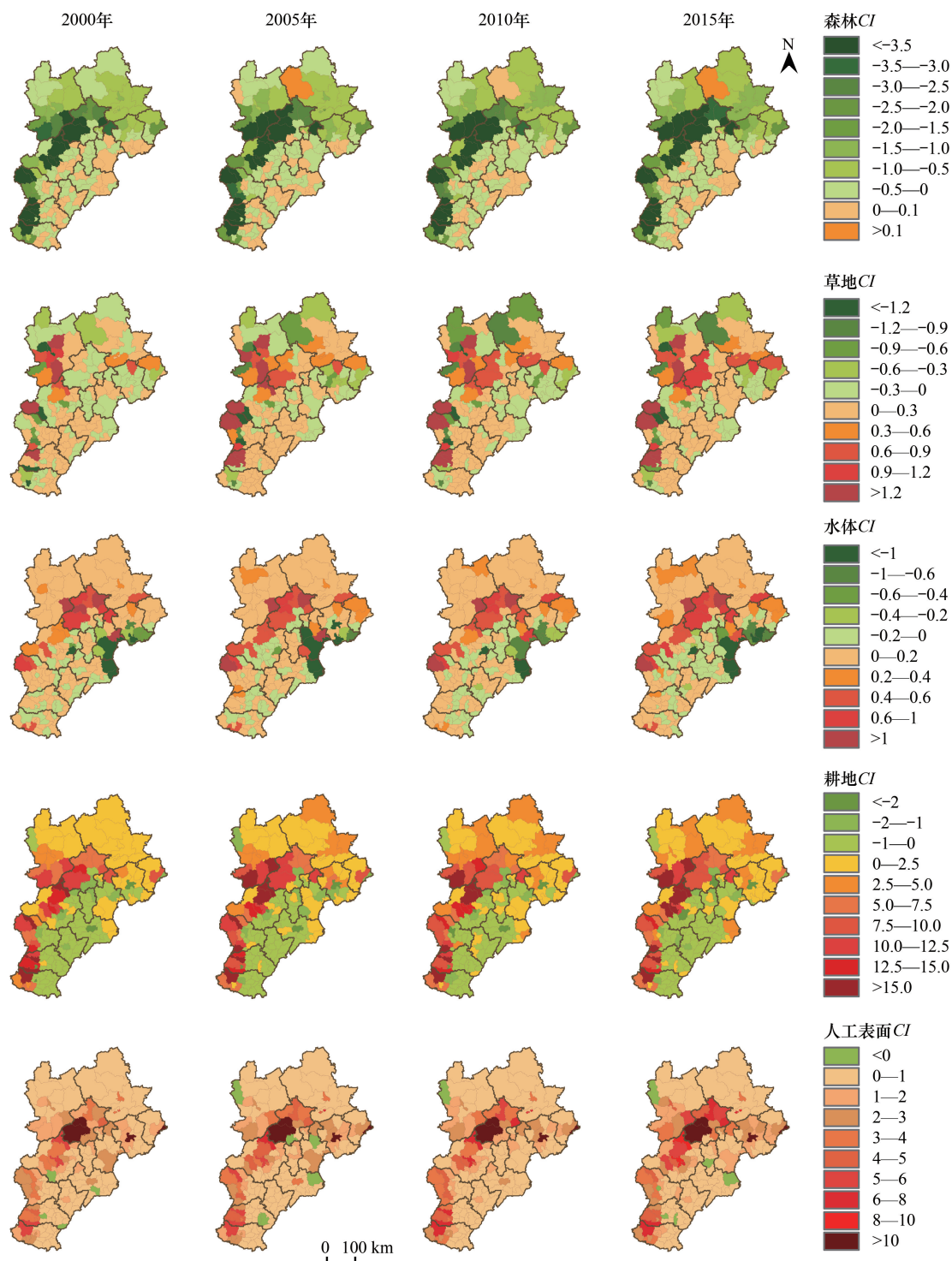


图 4 2000—2015 年京津冀不同源汇景观贡献度

Fig.4 Contribution index of different source-sink landscape types in Beijing-Tianjin-Hebei region (2000—2015)

CI 表示源区/汇区对空气污染的贡献度

扮演的源汇角色可能不同。从地区上来看,2000—2015 年森林源汇分布呈现高度的一致性,森林的汇区主要集中在北京、天津北部、唐山、保定、石家庄、邢台、邯郸西部和西北部,京津冀地区呈现一条明显的分割带。在带状的东南方,森林源汇分布破碎,可能是当地人口排放结构和景观格局所造成的。从时间上看,森林景观源汇的贡献分布多年变化不大,发展相对稳定;草地源汇的贡献分布整体相比森林更为复杂,与森林分布不同的是 2000—2015 年承德地区丰宁县的草地区域呈现汇的效应。从地区上看,草地主要源区集中在张家口、承德、北京、保定的地级市以及边界地带,并呈带状分布。带状以北,张家口和承德的草地源汇交错,带状以南,草地区域以贡献源为主,集中分布在邯郸、邢台、衡水、沧州等地区。从时间上来看,不同时期的草地景观源汇分布具有较高的相似性;水体贡献分布有相似规律,京津冀北部地区源效应较弱,南部地区源汇分布相对分散。从地区分布上看,张家口、承德地区水体主要为源效应,贡献强度不大,北京地区的水体作为源区提供了较多的贡献。水体的主要汇区集中在沧州的东部、天津的东南部以及唐山的南部,京津冀地区水体整体多以贡献源为主。从时间上看,水体源汇分布特征变化不大,张家口、承德和北京之间仍呈现明显的带状分布;耕地源汇分布与其他土地利用类型不同,京津冀地区北部耕地多作为源区,南部多为汇区。耕地源汇在张家口、承德和北京之间,以及保定、石家庄、邢台、邯郸的东部,出现了一条连续的特征带,特征带以北,耕地多为源效应,特征带以南,耕地以汇效应为主。从时间上看,耕地源汇格局变化不大,多年分布具有一定的相似性;京津冀人工表面的整体格局以贡献源为主,对污染物贡献较大的区域集中在京津冀的东部和中部,主要是北京的南部以及保定、石家庄、邢台、邯郸的东部,但张家口市尚义县、黄骅市等地区的人工表面处于汇区。从时间上看,人工表面的贡献程度有不断扩大和加剧污染的趋势。

3.4 污染综合评估模型

污染综合评估结果具有一定的分布特征(图 5)。从空间上看,京津冀地区污染综合影响北低南高,综合影响高的地区有北京南部、石家庄、邢台、邯郸以及衡水,唐山和沧州市区,这些地方都是城市化的中心区域,其人口规模、景观格局与生态环境之间的关系需重点关注。张家口和承德污染等级较低,这与当地的自然条件有关。除综合影响外,还可适当关注污染物的来源与传输以及区间的相互作用与影响。从时间上看,污染模式的结果差异不大,这些高污染模式的地区是传统重工业的集中地区,是关注的重点区域,同时受人类活动影响、景观格局与空气污染变化也是这些区间需要重点讨论与研究的方向。

4 结论与展望

为有效评估区域空气污染物的空间差异,本研究建立了区域空气污染物的综合评估范式。并利用 2000、2005、2010、2015 年的京津冀地区的 $\text{PM}_{2.5}$ 数据、土地覆盖类型数据以及人口栅格数据,开展了实证研究,得到以下结论:

(1) 基于城市群研究建立区域中尺度上的综合评估模型范式,可有效地评估区域尺度空气污染的综合效应,为空气污染物的区域性研究,提供方法和拓展实例。

(2) 京津冀城市群空气污染空间差异化的示范结果表现为:

1) 2000—2015 年,京津冀城市群的人口暴露风险和空气污染分布呈现北低南高的特征,这与当地的人口、工业分布以及自然条件有关。人口暴露风险和空气污染总体上呈上升趋势,2015 年最为严重,污染和暴露风险主要分布在除张家口、承德、秦皇岛的其他市域。

2) 各县域空气污染物的空间分布和综合评估:①各县域的人口暴露风险和空气污染的范围、程度呈上升趋势。②污染物不仅来自于人工生态系统,还来自于自然生态系统,森林、草地、耕地等土地利用类型作为主要的污染物汇区的同时,也可能是污染物的源区。同一种土地利用类型在不同污染现象中扮演的贡献角色不同。比如水体在城市热岛问题中作为主要的汇区,在空气污染中,水体吸收空气污染物的能力相比吸收温度的能力较弱,长时序的污染物停留导致水体周围的空气污染物浓度含量偏高,且以污染源的形式出现。区域空气质量的研究应随城市化的发展同步开展,并不断协调。在注重空气污染与生态格局关联的同时,还需加

强对区域内部相互作用影响的研究,为城市的可持续发展提供科学支撑。

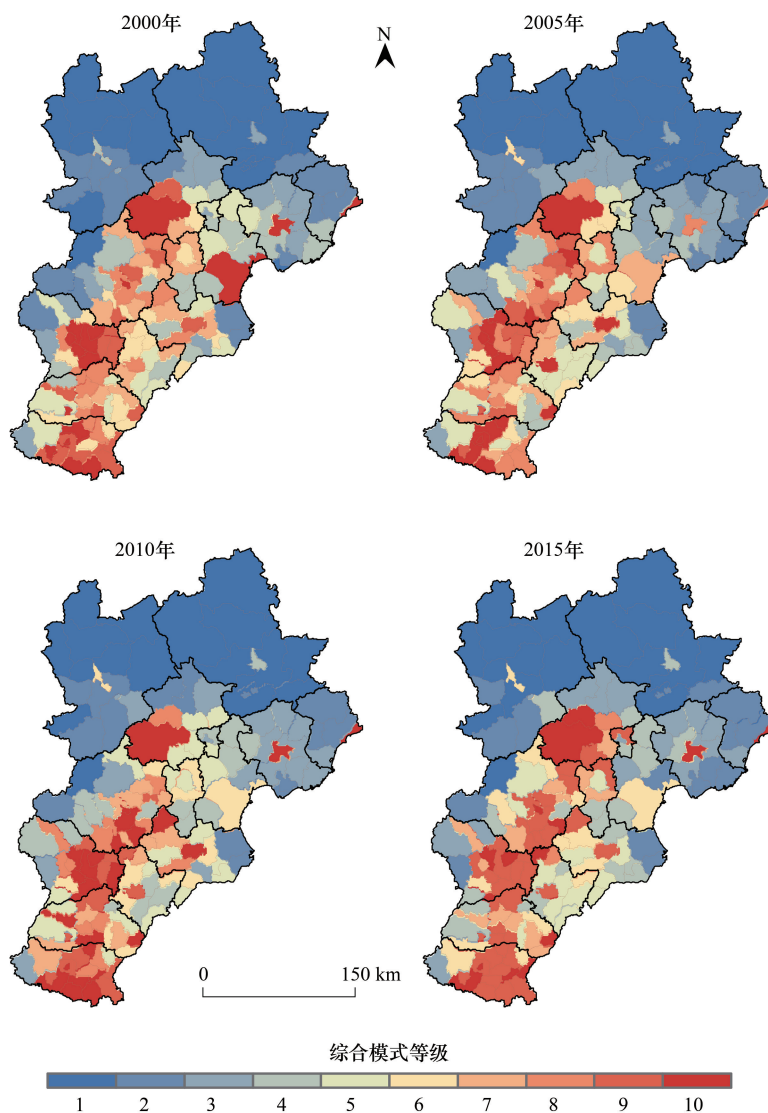


图5 2000—2015年京津冀综合评估模型

Fig.5 Comprehensive evaluation of $PM_{2.5}$ pollution in Beijing-Tianjin-Hebei region (2000—2015)

参考文献 (References):

- [1] Bai X M, Shi P J, Liu Y S. Realizing China's Urban dream. *Nature*, 2014, 509(1799): 158-160.
- [2] 王德庆, 王宝庆, 白志鹏. $PM_{2.5}$ 污染与居民每日死亡率关系的 Meta 分析. *环境与健康杂志*, 2012, 29(6): 529-532.
- [3] 刘帅, 宋国君. 城市 $PM_{2.5}$ 健康损害评估研究. *环境科学学报*, 2016, 36(4): 1468-1476.
- [4] 李辉, 郭家秀, 尹华强. $PM_{2.5}$ 对人体健康的影响研究进展. *四川化工*, 2013, 16(1): 52-54.
- [5] Liu M M, Huang Y N, Ma Z W, Jin Z, Liu X Y, Wang H K, Liu Y, Wang J N, Jantunen M, Bi J, Kinney P L. Spatial and temporal trends in the mortality burden of air pollution in China: 2004—2012. *Environment International*, 2017, 98: 75-81.
- [6] Han L J, Zhou W Q, Li W F. Fine particulate ($PM_{2.5}$) dynamics during rapid urbanization in Beijing, 1973 - 2013. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 23604.
- [7] Han L J, Zhou W Q, Pickett S T A, Li W F, Qian Y G. Multicontaminant air pollution in Chinese cities. *Bulletin of the World Health Organization*, 2018, 96(4): 233-242E.
- [8] Han L J, Zhou W Q, Li W F, Li L. Impact of urbanization level on urban air quality: a case of fine particles ($PM_{2.5}$) in Chinese cities.

Environmental Pollution, 2014, 194: 163-170.

- [9] Chan C K, Yao X H. Air pollution in mega cities in China. Atmospheric Environment, 2008, 42(1): 1-42.
- [10] 韩立建. 城市化与 PM_{2.5}时空格局演变及其影响因素的研究进展. 地理科学进展, 2018, 37(8): 1011-1021.
- [11] Parrish D D, Zhu T. Clean air for megacities. Science, 2009, 326(5953): 674-675.
- [12] 王冠岚, 薛建军, 张建忠. 2014 年京津冀空气污染时空分布特征及主要成因分析. 气象与环境科学, 2016, 39(1): 34-42.
- [13] 刘海猛, 方创琳, 黄解军, 朱向东, 周艺, 王振波, 张蕾. 京津冀城市群大气污染的时空特征与影响因素解析. 地理学报, 2018, 73(1): 177-191.
- [14] Hammer M S, van Donkelaar A, Li C, Lyapustin A, Sayer A M, Hsu N C, Levy R C, Garay M J, Kalashnikova O V, Kahn R A, Brauer M, Apte J S, Henze D K, Zhang L, Zhang Q, Ford B, Pierce J R, Martin R V. Global estimates and long-term trends of fine particulate matter concentrations (1998-2018). Environmental Science & Technology, 2020, 54(13): 7879-7890.
- [15] 别同, 韩立建, 田淑芳, 周伟奇, 李伟峰, 钱雨果. 城市化对空气污染人群暴露贡献的定量方法研究. 生态学报, 2018, 38(13): 4570-4583.
- [16] Hyslop N P. Impaired visibility: the air pollution people see. Atmospheric Environment, 2008, 43(1): 182-195.
- [17] 游燕, 白志鹏. 大气颗粒物暴露与健康效应研究进展. 生态毒理学报, 2012, 7(2): 123-132.
- [18] 傅尧, 王琛, 王乐, 唐祎骅, 李晓星, 狄雅肖. 河北省 PM_{2.5}污染变化特征及暴露人群健康效应评估研究. 环境科学与管理, 2016, 41(12): 187-190.
- [19] Kousa A, Kukkonen J, Karppinen A, Aarnio P, Koskentalo T. A model for evaluating the population exposure to ambient air pollution in an urban area. Atmospheric Environment, 2002, 36(13): 2109-2119.
- [20] 伏晴艳, 阚海东. 城市大气污染健康危险度评价的方法 第四讲 大气污染的暴露评价 第二节 大气扩散模型及人口加权的大气污染暴露评价(续四). 环境与健康杂志, 2004, 21(6): 414-416.
- [21] 张西雅, 扈海波. 基于多源数据的北京地区 PM_{2.5}暴露风险评估. 北京大学学报: 自然科学版, 2018, 54(5): 1103-1113.
- [22] 陈利顶, 傅伯杰, 赵文武. “源”“汇”景观理论及其生态学意义. 生态学报, 2006, 26(5): 1444-1449.
- [23] Xu S L. An approach to analyzing the intensity of the daytime surface urban heat island effect at a local scale. Environmental Monitoring and Assessment, 2009, 151(1/4): 289-300.
- [24] 高静, 龚健, 李靖业. “源-汇”景观格局的热岛效应研究——以武汉市为例. 地理科学进展, 2019, 38(11): 1770-1782.
- [25] 权秋梅, 王聪, 杨磊, 刘焱序, 孙艺铭, 王超. 景观生态学在大气污染研究中的应用. 生态学报, 2021, 41(2): 435-443.
- [26] 陈利顶, 周伟奇, 韩立建, 孙然好. 京津冀城市群地区生态安全格局构建与保障对策. 生态学报, 2016, 36(22): 7125-7129.
- [27] van Donkelaar A, Martin R V, Li C, Burnett R T. Regional estimates of chemical composition of fine particulate matter using a combined geoscience-statistical method with information from satellites, models, and monitors. Environmental Science & Technology, 2019, 53(5): 2595-2611.
- [28] Han L J, Zhou W Q, Zhao X L, Li W F, Qian Y G. Comparing ground operation-measured and remotely sensed fine-particulate matter data: a case to validate the Dalhousie product in China. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 2019, 7(3): 20-28.
- [29] 孙敏, 陈健, 林鑫涛, 杨山. 城市景观格局对 PM_{2.5}污染的影响. 浙江农林大学学报, 2018, 35(1): 135-144.